

运用主成分分析方法诊断和消除风云三号B星微波湿度计观测数据中的噪音

邹晓蕾^{1, 2} 马原² 秦正坤¹

(1 南京信息工程大学资料同化与研究应用中心, 南京 210044; 2 佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, 美国)

摘要: 风云三号A星和B星上的微波湿度计 (MWHS) 在183GHz附近有3个水汽探测通道 (通道3~5)。搭载在MetOp和NOAA卫星上的微波湿度计 (MHS) 在相同频率上也有3个水汽探测通道。MWHS和MHS都是跨轨扫描仪器。通过对比MWHS观测亮温和用辐射传输模式模拟得到的亮温, 发现在这3个通道的观测中都存在着沿轨道方向、随扫描角变化的直线形噪音。即使对足够长时间里的大量资料进行平均分析, 该噪音也没有消除, 说明噪音并不是由大气或地表的自然变化引起的。通道3~5噪音的大小分别是0.3, 0.2和0.2K。用主成分分析方法 (PCA) 对MWHS一个月的资料进行研究, 发现MWHS的直线形噪音主要存在于第一模态中, MWHS的直线形噪音叠加在该模态所主要描述的观测亮温随扫描角变化特征, 即跨轨仪器的主要特性。对于这3个水汽探测通道, 第一主成分解释了超过99.91%的总方差。将第一主成分进行5点平滑再对原观测数据重构可以有效地去除MWHS资料中的噪音。重构后的资料随扫描角的变化变得比较平滑, 与MHS偏差随扫描角的变化特征一致。

关键词: 风云三号B星 (FY-3B), 微波湿度计 (MWHS), 微波湿度计 (MHS), 主成分分析方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.006

Fengyun-3B MicroWave Humidity Sounder (MWHS) Data Noise Characterization and Filtering Using Principle Component Analysis

Zou Xiaolei^{1, 2}, Ma Yuan², Qin Zhengkun¹

(1 Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Florida State University, USA)

Abstract: MicroWave Humidity Sounder (MWHS) onboard both Fengyun-3A (FY-3A) and FY-3B satellites have three channels (channels 3-5) near the 183-GHz water-vapor absorption line. These channel frequencies are also used in other instruments such as Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B) and Microwave Humidity Sounder (MHS) onboard MetOp and NOAA satellites. Both MWHS and MHS are cross-track scanners. In this paper, a comparison between the simulated brightness temperatures with MWHS measurements clearly shows that MWHS observations from the three sounding channels contain a scan-angle-dependent cohesive noise along the instrument scanline. This noise does not cancel out when a large amount of data over a sufficiently long period of time is averaged, which eliminates the possibility of such a noise to arise from the natural variability of the atmosphere and the surface. The noises are around 0.3, 0.2, and 0.2 K for channels 3-5, respectively. A principle component analysis is used for the characterization of this cohesive noise using one-month FY-3B MWHS data. It is shown that the MWHS cohesive noise is primarily contained in the first principal component (PC) mode, which mainly describes a scan-angle-dependent brightness temperature variation, i.e., a unique feature of the cross-tracking instrument. The first PC accounts for more than 99.91% total variance in the three MWHS sounding channels. A five-point smoother is then applied to the first PC, which effectively removes such a data noise in the MWHS data. The reconstruction of the MWHS radiance spectra using the noise-filtered first PC component is of good quality. The scan-angle-dependent bias from the reconstructed MWHS data becomes more uniform and is consistent with the NOAA-18 MHS data.

Keywords: Fengyun-3B (FY-3B), MicroWave Humidity Sounder (MWHS), Microwave Humidity Sounder (MHS), principal component analysis (PCA)

收稿日期: 2013年4月15日; 修回日期: 2013年6月8日

第一作者: 邹晓蕾 (1960—), Email: xzou@fsu.edu

资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2010CB951600 和 2009CB421500); 美国 NSF 项目 (AGS-1037936); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906006)

1 引言

中国第二代极轨卫星系列中的第一颗卫星——风云三号A星 (FY-3A) 于2008年5月27日成功发射, 搭载在其上的大气探测仪器的性能满足甚至超出预期的效果^[1, 2]。两年后, 该系列中的第二颗卫星——风云三号B星 (FY-3B) 于2010年11月5日发射。FY-3A

是上午星，越赤道时间为上午10:00；FY-3B为下午星，越赤道时间为下午1:30。FY-3B与FY-3A携带11种相同的观测仪器，微波湿度计（MWHS）是其中之一。MWHS有5个通道，分布在从150~190 GHz不等的频率上，其中高层的3个通道的中心频率与搭载在NOAA-15/16/17上的先进微波湿度探测仪（AMSU-B）以及NOAA-18/19和MetOp-A上的微波湿度计（MHS）对流层中下层3个水汽探测通道几乎完全一样。

除了强降水，在其他所有天气条件下，MWHS和MHS的5个通道都可以对大气中的水汽和冰进行观测^[3]。MWHS和MHS是跨轨扫描探测器，沿着扫描线不同观测点的观测角度是不同的。水汽观测数据中存在着多种来源的污染，其中跨轨观测仪器的临边效应就可能与大气物理量的真实信息混杂在一起。在晴空大气的条件下，临边效应只与观测角有关，并且相对于星下点是对称的，因而临边效应可以用辐射传输模式准确地模拟出来。模拟值与观测值之间的偏差则可以用来探索由仪器本身引起的、与扫描角有关的误差，如AMSU-A^[4,5]及AMSU-B^[6]的极向偏差和天线角度误差。

本文中，比较了FY-3B MWHS的观测亮温与用预报场通过辐射传输模式模拟的亮温，发现MWHS数据中存在着仅与视场（FOV）位置有关的直线型噪音，即相同观测角度的噪音大小相同。使用主成分分析方法（PCA）滤除了这种噪音，同时尽量少改变观测资料中包含的天气现象特征。利用PCA检测分析地球探测数据中噪音的研究由来已久，譬如：Antonelli等基于PCA构造了一个滤波器，来删去高阶主成分量，从而减少了高光谱红外观测和模拟中的随机噪音^[7]；Tobin等也指出利用PCA可以有效诊断和滤除大气红外探测仪（AIRS）及其他高光谱数据中的误差^[8]，并使

用PCA消除了AIRS仪器线性的小幅扭曲^[9]。

本文结构如下：第2节说明了FY-3B MWHS仪器特征、所用的辐射传输模式，以及模式使用的数据。观测数据的全球误差和标准差，以及偏差随不同观测角的变化在第3节中展示。第4节中介绍了MWHS数据中的线形误差，如何用PCA研究这种误差的特征，以及怎样用基于PCA的5点平滑来重构MWHS数据从而滤除这种误差。第5节为全文总结。

2 MWHS观测资料和辐射传输模式模拟

2.1 MWHS 资料

本文中使用了2011年4月FY-3B MWHS和NOAA-18 MHS的L1B资料。FY-3B和NOAA-18都是下午星，它们越赤道时间分别是下午1:30和2:00。表1总结了MWHS和MHS的主要特性^[3]。MWHS通道1的中心频率是150GHz（垂直极向），而MHS为89GHz（垂直极向）。两个仪器通道2~5的中心频率都相同，分别是150GHz（水平极向）， $183.31 \pm 1\text{GHz}$ （垂直极向）， $183.31 \pm 3\text{GHz}$ （垂直极向）和 $183.31 \pm 7\text{GHz}$ （垂直极向）。MWHS和MHS的通道1~2是地面窗区通道，通道3~5的权重函数峰值分别位于400，600和800hPa。MWHS和MHS观测每一条扫描线用时8/3s，两个仪器的水平分辨率在星下点均为15km。MWHS的扫描线上有98个扫描点，轨道宽度为2700km，MHS的扫描线上有90个扫描点，轨道宽度为2250km。MWHS通道3~5的噪声等效温度（NEDT）分别是1.10，0.90和0.90K，而MHS为0.55，0.42和0.35 K^[10]。这3个通道对对流层的温度、水汽和云的信息较为敏感^[5]，本文中仅针对于该3个通道对MWHS和MHS的观测数据进行比较。目前世界上主要数值预报业务中心在预报系统中都采用和同化NOAA-18 MHS的资料^[11]，而美国海洋大气管理局（NOAA），欧洲中尺度天气预报中心（ECMWF）

表1 FY-3B MWHS 仪器特征

通道		中心频率 (GHz)		波段宽度 (MHz)		NEAT (K)	
MHS	MWHS	MHS	MWHS	MHS	MWHS	MHS	MWHS
1		89 (V)	150 (V)	1000×2		0.23	0.90
2		150 (V)	150 (H)	1000×2		0.37	0.90
3		183.31 ± 1 (H)	183.31 ± 1 (V)	500×2		0.55	1.10
4		183.31 ± 3 (H)	183.31 ± 3 (V)	1000×2		0.42	0.90
5		190.31 (V)	183.31 ± 7 (V)	2000×2		0.35	0.90
通道		星下点分辨率 (km)		权重函数峰值 (hPa)		轨道宽度 (km)	
MHS	MWHS	MHS	MWHS	MHS	MWHS	MHS	MWHS
1		15	15	地表	地表	2250	2700
2		15	15	地表	地表	2250	2700
3		15	15	400	400	2250	2700
4		15	15	600	600	2250	2700
5		15	15	800	800	2250	2700

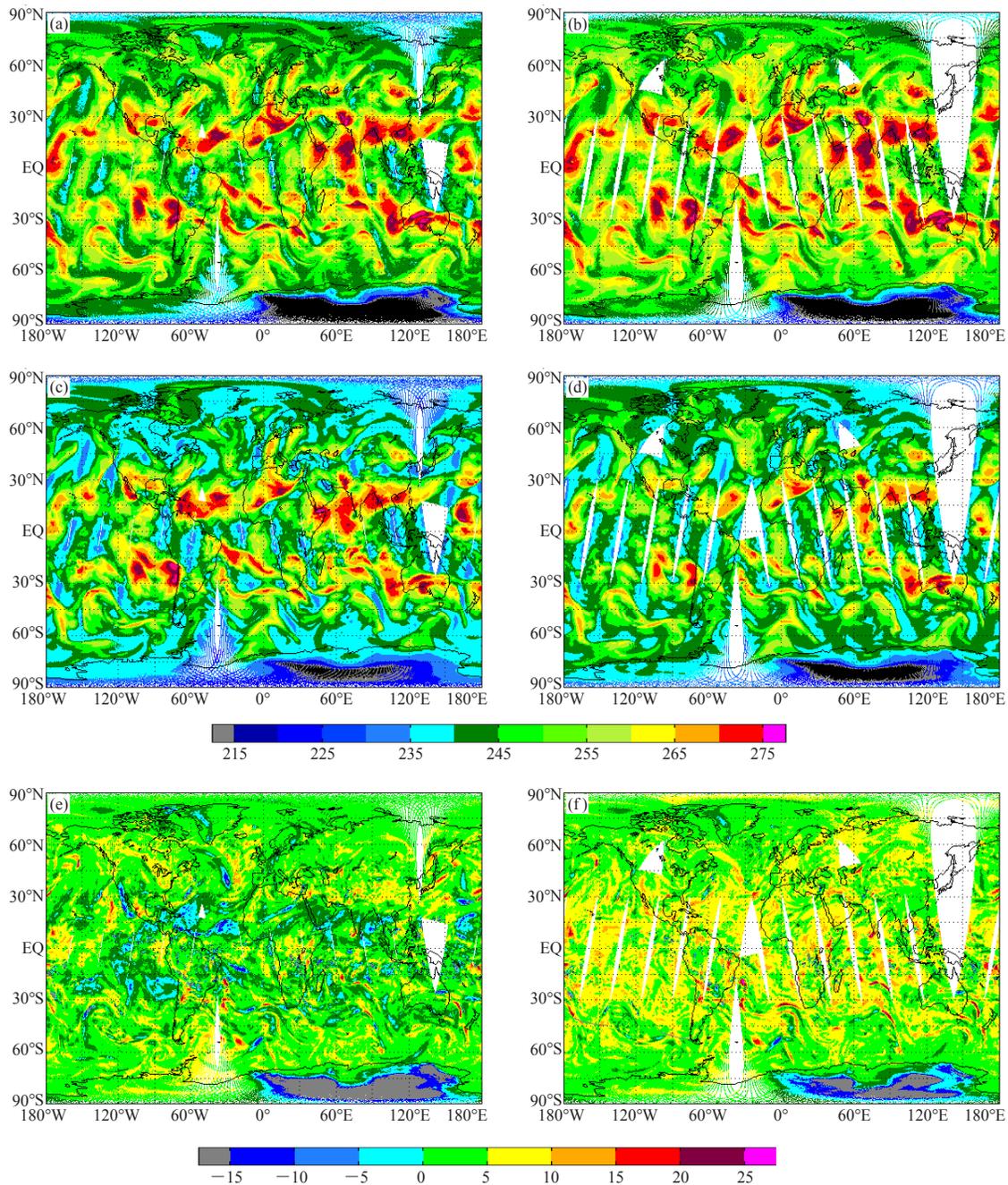


图1 2011年4月2日03:00-15:00 (世界时) MWHS (左) 以及MHS (右) 通道3的观测亮温 (a, b), 模拟亮温 (c, d) 和观测亮温与模拟亮温的差 (e, f)

和中国正着力研究MWHS未来在业务中的应用。MWHS和MHS的通道1中心频率不同, 所以不具备可比性; 而通道2之间的比较则需要运用更多的辅助数据 (如地表参数) 和更先进的辐射传输模式, 故本文中这两个通道不作讨论。

2.2 辐射传输模式

美国卫星数据同化中心 (JCSDA) 开发的辐射传输模式 (The Community Radiative Transfer Model,

CRTM) 可以快速计算各种大气和地表条件下的辐射和其他衍生的产品^[12, 13]。本文用该模式模拟MWHS和MHS各通道的亮温。本文中除了仪器参数, 模式计算时还使用了美国国家环境预报中心 (NCEP) 全球预报系统 (GFS) 6h预报场, 其水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向有26层, 层顶为10hPa。CRTM的输入变量包括: 温湿压的垂直廓线, 地表参数 (如地表温度、10m风), 需要的其他仪器参数为天顶角和观测角。

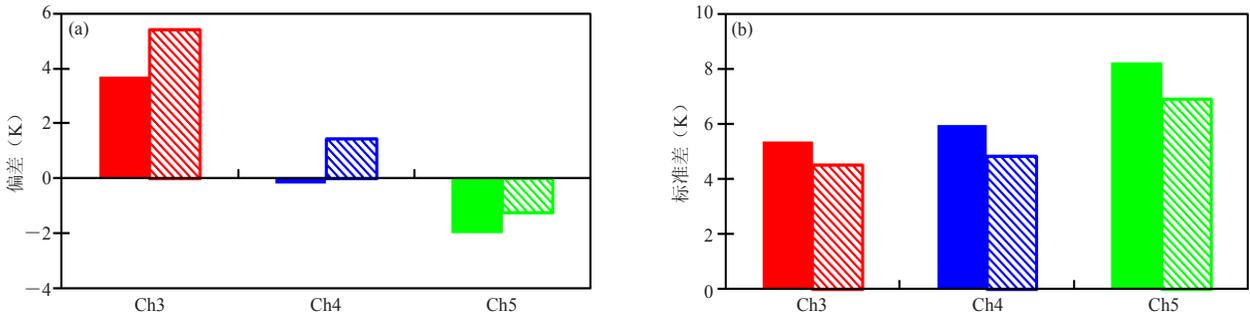


图2 2011年4月2—30日通道3 (红), 4 (蓝), 5 (绿) 观测与模拟亮温之差的全球误差 (a) 和标准差 (b)

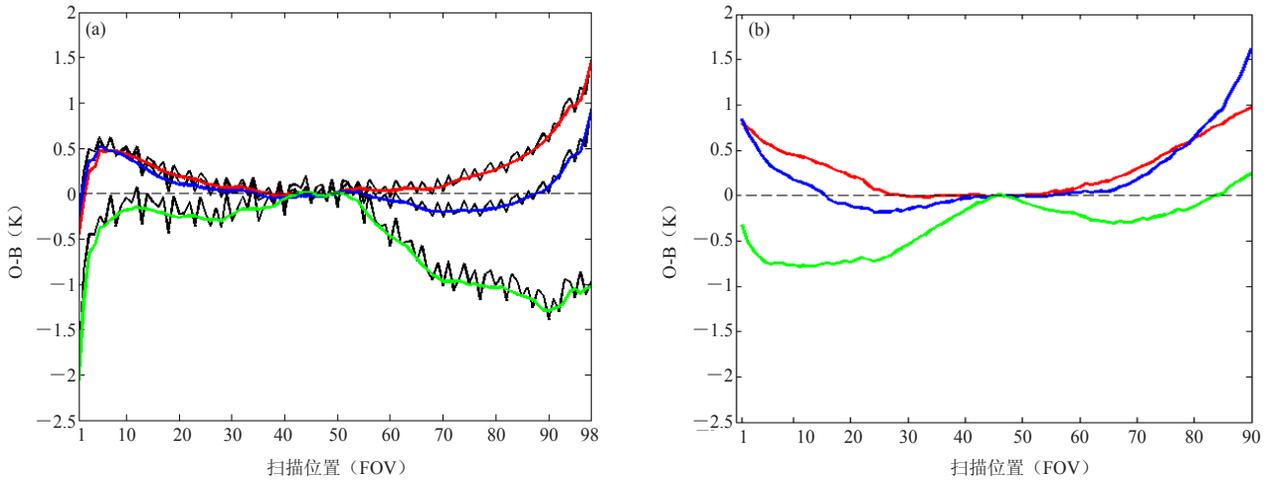


图3 (a) MWHS的观测 (黑) 与重构场通道3 (红), 4 (蓝), 5 (绿) O-B的误差随扫描角的变化; (b) 与 (a) 类似, 为MHS (所有的O-B都减去了星下点的误差)

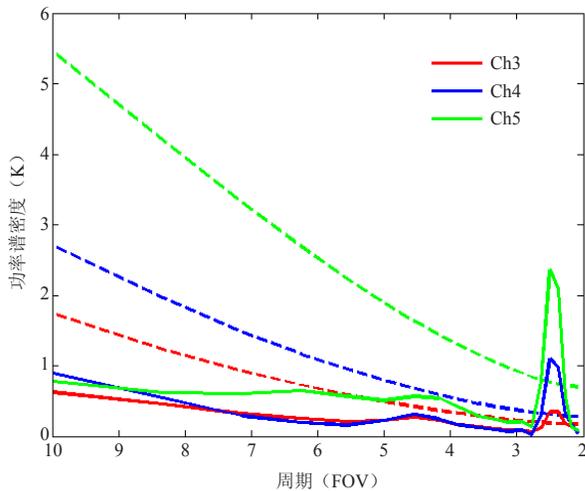


图4 2011年4月MWHS通道3 (红), 4 (蓝), 5 (绿) 全球月平均O-B的功率谱密度 (实线) 及95%置信度 (虚线)

3 主成分分析方法

本文中对每轨资料分别运用主成分分析方法 (PCA)。MWHS的亮温观测资料可以用来构造观测数据矩阵 (A) :

$$A_{98 \times N} = \begin{pmatrix} TB_{1,1} & \cdots & TB_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ TB_{98,1} & \cdots & TB_{98,N} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $TB_{k,j}$ ($k=1, 2, \dots, 98, j=1, 2, \dots, N$) 表示在该轨资料第 j 条扫描线的第 k 个视场的亮温观测值, N 是参加计算的扫描线的总条数。

A 的相关矩阵 (S) 则为:

$$S = AA^T,$$

其特征值 ($\lambda_i, i=1, \dots, 98$) 和特征向量 ($\bar{e}_i, i=1, \dots, 98$) 计算如下:

$$S\bar{e}_i = \lambda_i \bar{e}_i \quad (\lambda_i, i=1, \dots, 98) \quad (2)$$

其中

$$\bar{e}_i = \begin{pmatrix} e_{1,i} \\ e_{2,i} \\ \vdots \\ e_{98,i} \end{pmatrix}$$

为第 i 个模态的主成分, λ_i 表征了第 i 个模态对 A 中数据方差总数的贡献。式 (2) 的矩阵形式为:

$$SE = EA \quad (3)$$

其中

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{98} \end{pmatrix}, E = (\bar{e}_1 \quad \bar{e}_2 \quad \cdots \quad \bar{e}_{98})$$

由于 \bar{e}_i ($i=1, \dots, 98$) 为正交向量, $E^{-1} = E^T$ 。故

$$S = EAE^T \quad (4)$$

最后, 主成分系数矩阵 (U) 可由下式求得:

$$U = E^T A = \begin{pmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \cdots & u_{1,N} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \cdots & u_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{98,1} & u_{98,2} & \cdots & u_{98,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \vdots \\ \bar{u}_{98} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, $\bar{u}_i = (u_{i,1} \quad u_{i,2} \quad \cdots \quad u_{i,N})$ 为第 i 个模态的主成分系数。

本文对存在“噪音”的第一主成分 \bar{e}_1 进行了平滑, 并重构了观测数据, 即:

$$A^{reconstructed} = \bar{e}_1^{sm} \bar{u}_1 + \sum_{i=2}^{98} \bar{e}_i \bar{u}_i \quad (6)$$

将 \bar{e}_1 进行五点平滑即可得到 \bar{e}_1^{sm} 。

4 数值结果

4.1 偏差与标准差

图1为2011年4月2日03:00—15:00 (世界时) 共12h内MWHS和MHS第3通道的观测亮温 (图1a~b)、模式模拟亮温 (图1c~d) 以及观测亮温与模拟亮温之间的差异 (图1e~f) 的全球分布。MWHS观测的亮温分布总体上与MHS非常接近。MWHS的轨道更宽, 且观测值随观测角的变化较大。图2是2011年4月FY-3B MWHS和NOAA-18 MHS在星下点观测亮温和模拟亮温之间误差和标准差的月平均值。MWHS资料的误差与MHS非常接近, 其中通道3的误差最大 (3~6K); 而MWHS每个通道的标准差都比MHS大, 说明MWHS数据中的变化幅度较大。标准差的大小随通道编号增加而增加。

图3a和3b分别为MWHS和MHS误差随观测角的变化。可见相对于星下点位置, 两个仪器各个通道随观测角的变化是左右不对称的。MWHS的观测资料中存在着随观测角变化的高频振荡噪音信号 (图略), 这导致每个通道的O-B (观测减去模拟) 误差都有类似的噪音 (图3a)。相比之下, MHS资料的O-B误差 (图3b) 则要平滑很多。

为了探究MWHS误差随观测角变化的周期性, 对2011年4月MWHS所有轨道的资料进行了功率谱分析, 平均后得到全球月平均O-B功率谱密度, 如图4所示, 95%置信度用虚线表示。图4中的功率谱密度表

征了MWHS观测资料沿不同扫描线的总体变化频率特征。可以看到频率升高, 数据变化幅度降低, 但在周期为2.6个视场处, 在各个通道都存在很强的高频振荡信号。对流层低层的通道5比通道3、4噪音要大。

4.2 MWHS 仪器噪音特征的主成分分析

PCA方法将可能存在相关性、随观测角变化的每轨亮温资料转化成为不相关的各个成分, 每个主成分都说明了MWHS数据的内部结构: 第一主成分最大程度地代表了数据间的变化; 之后的各个主成分则对于总方差的贡献依次递减, 而每个主成分都与之前所有已知的主成分相正交 (即不相关)。第一个主成分对总方差的贡献超过了99.91%, 而前10个主成分已经可以解释总方差的99.99%。

用MWHS通道3在2011年4月2日01时 (世界时) 的资料可以计算出主成分系数 (式 (5) 中的 \bar{u}_i) 以及主成分与成分系数的乘积 (式 (6) 中的 $\bar{u}_i \bar{e}_i$), 图5展示了前3个模态。资料中的每轨资料都是自南向北再从北向南, 主成分系数 \bar{u}_i (图5a) 清晰地表现了亮温随纬度的变化。在同一条扫描线上, 跨轨扫描仪器的扫描角较小时测到的亮温高, 扫描角较大时测到的亮温低, 这一特征体现在主成分与主成分系数的乘积上, 即 $\bar{u}_i \bar{e}_i$ (图5b)。第二模态表现出了亮温随扫描角变化的不对称性, 第三模态则反映了亮温在高中低纬度带大小不同、在每条扫描线上左右对称的特点。

对于2011年4月2日01时 (世界时) 的一轨资料进行功率谱分析, 可以得到通道3 (图6a~b), 通道4 (图6c~d) 和通道5 (图6e~f) 资料中每个模态对总功率谱密度的贡献。图6左列为所有98个模态在每个可识别的周期上功率谱密度与95%置信度之间的差, 右列将左图放大后取前10个模态。该图中的计算结果有如下3个特征: (1) 越高次的模态, 功率谱密度高值对应的周期越小; (2) 在图3a和图4中出现的周期为2.6个视场的高频噪音存在于第一模态中; (3) 相较于400和600hPa的通道3和4, 位于800hPa的通道5需要更多模态来解释数据间的变化。

本文同时也对所有的主成分进行了傅里叶分析, 图7中展示了前5个主成分的结果。该图进一步证明了MWHS资料中的高频噪音存在于第一模态中。

4.3 资料中线形噪音的消除

由于高频噪音主要存在于第一模态中 (如图6和7), 我们对第一主成分进行了五点平滑, 然后按照式 (6) 对MWHS观测资料进行了重构。对每个通道的观测亮温和重构的亮温作差, 便可以得到如图8所示的直

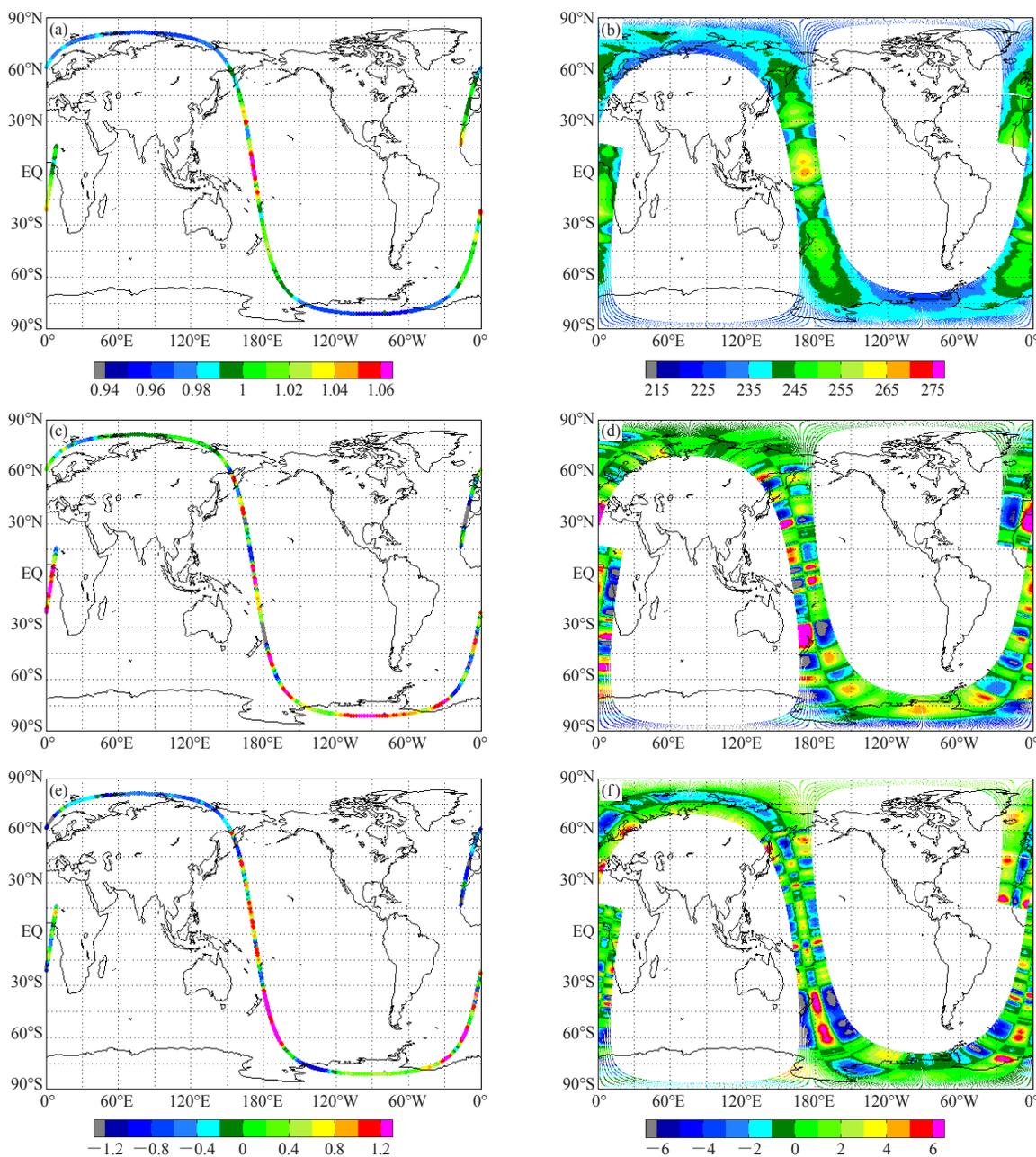


图5 由2011年4月2日01:14—02:55 (世界时) 的一轨MWS资料的通道3观测数据计算出的第一 (a, b), 第二 (c, d) 和第三 (e, f) 主成分系数 (\bar{u}_i , 左列) 和主成分系数与主成分的乘积 ($\bar{u}_i \bar{e}_i$, 右列)

线形噪音, 即即使在不同扫描线上, 只要观测位置相同, 资料中的噪音就相同。这样的特征解释了为什么不同扫描线上资料间具有高相关性, 也解释了为什么MWS资料噪音的存在于第一模态上。

图8也表明, 这种基于PCA的平滑在陆地和海洋都可以滤除数据中的噪音。我们也验证了在有云的条件下, 上文中提到的直线形噪音没有改变。图9为用NOAA-18先进微波温度探测仪 (AMSU-A) 和MWS的地面通道分别反演出的云水路径 (LWP) 和冰水路径 (IWP), 其时间和区域均与图8a~c相同。可见, 不

管在晴空还是有云的条件下, 我们提出的方法都可以成功滤除噪音。

既然在图8中对第一主成分进行五点平滑, 可以滤除周期性的噪音, 很自然地联想到对于原数据直接进行五点平滑, 是否也可以得到相同结果。图10为MWS的观测资料与直接五点平滑后的亮温场之间的差异, 其时间与图8一致。与图8相比, 直接对MWS资料进行五点平滑对观测数据的改变很大, 其量级甚至超过了图8中的噪音, 说明这种方法已经改变了观测资料中与天气相关的特征。功率谱分析 (图11) 表

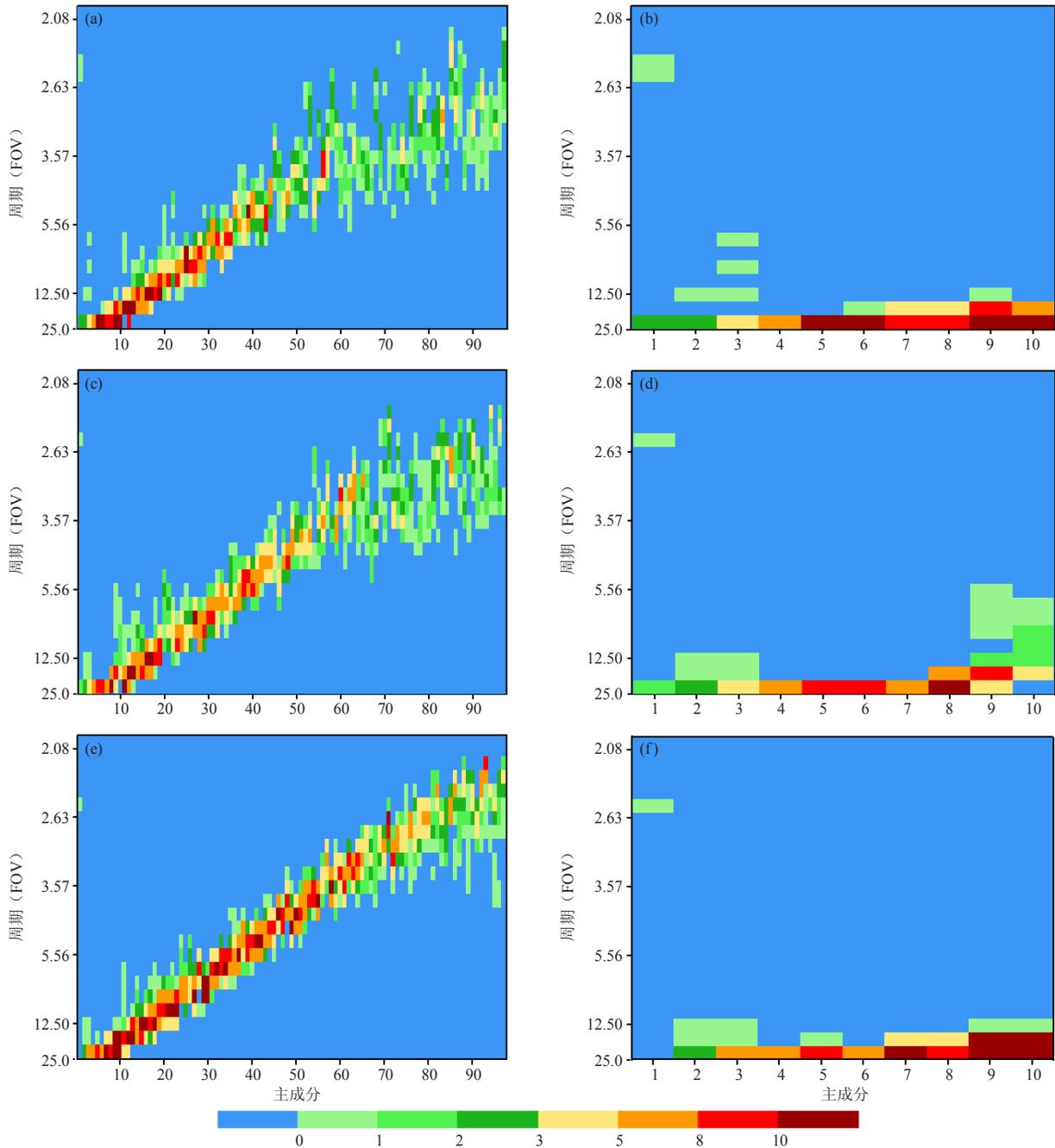


图6 MWHS通道3 (a, b), 通道4 (c, d) 和通道5 (e, f) 各个周期的功率谱密度 (超过95%置信度) 的分布。左列为所有98个主成分, 右列为前10个主成分。所用的资料与图5一样

明, 主成分分析方法滤除的噪音周期均为约2.5个视场, 而直接平滑滤除的噪音周期则为3~10个视场不等。前者对于不同扫描线滤除的信号大小固定, 而后者则差别很大。这样的对比进一步表明, 本文提出的方法对于滤除MWHS数据中存在的直线形噪音是有效的, 由于真实的信息没有投影到第一主成分上, 所以仅平滑第一主成分并不会改变资料中的有用信息。

MWHS通道3~5的PCA重构场与模式预报场的差

值随扫描角的变化如图3所示。与原来的资料相比, O-B随扫描角的变化平滑多了, 而同时并没有改变资料中大尺度的天气特征。

5 总结

在FY-3B MWHS的资料可以被应用于数值天气预报和气候研究以前, 检测、分析和滤除其观测数据中的噪音非常重要。本文用PCA分析了MWHS数据, 对第一模态进行5点平滑滤除了数据中的噪音。这种基

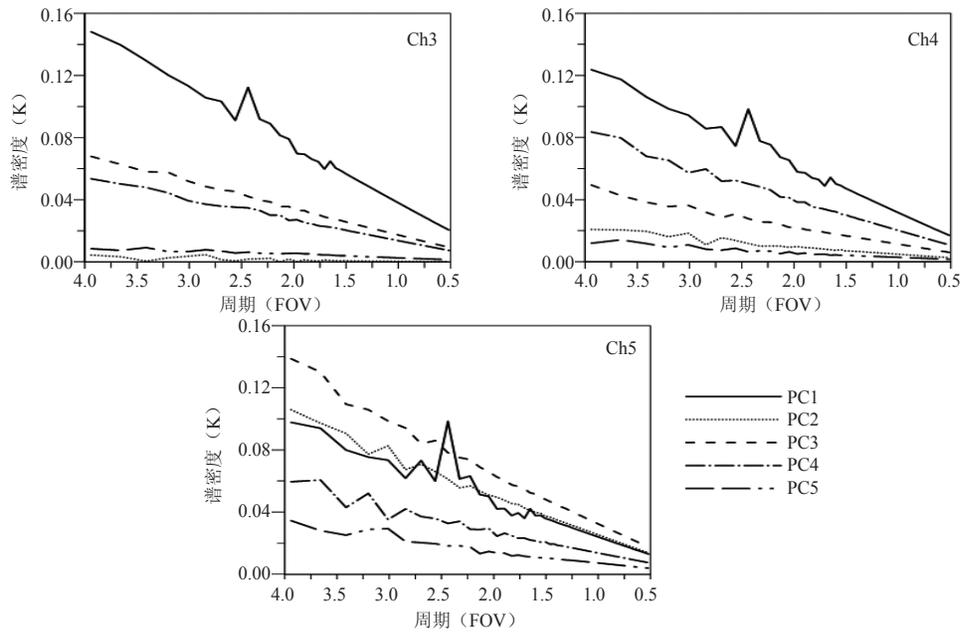


图7 MWHS通道3~5前5个主成分的傅里叶分析 (所用的资料与图5一样)

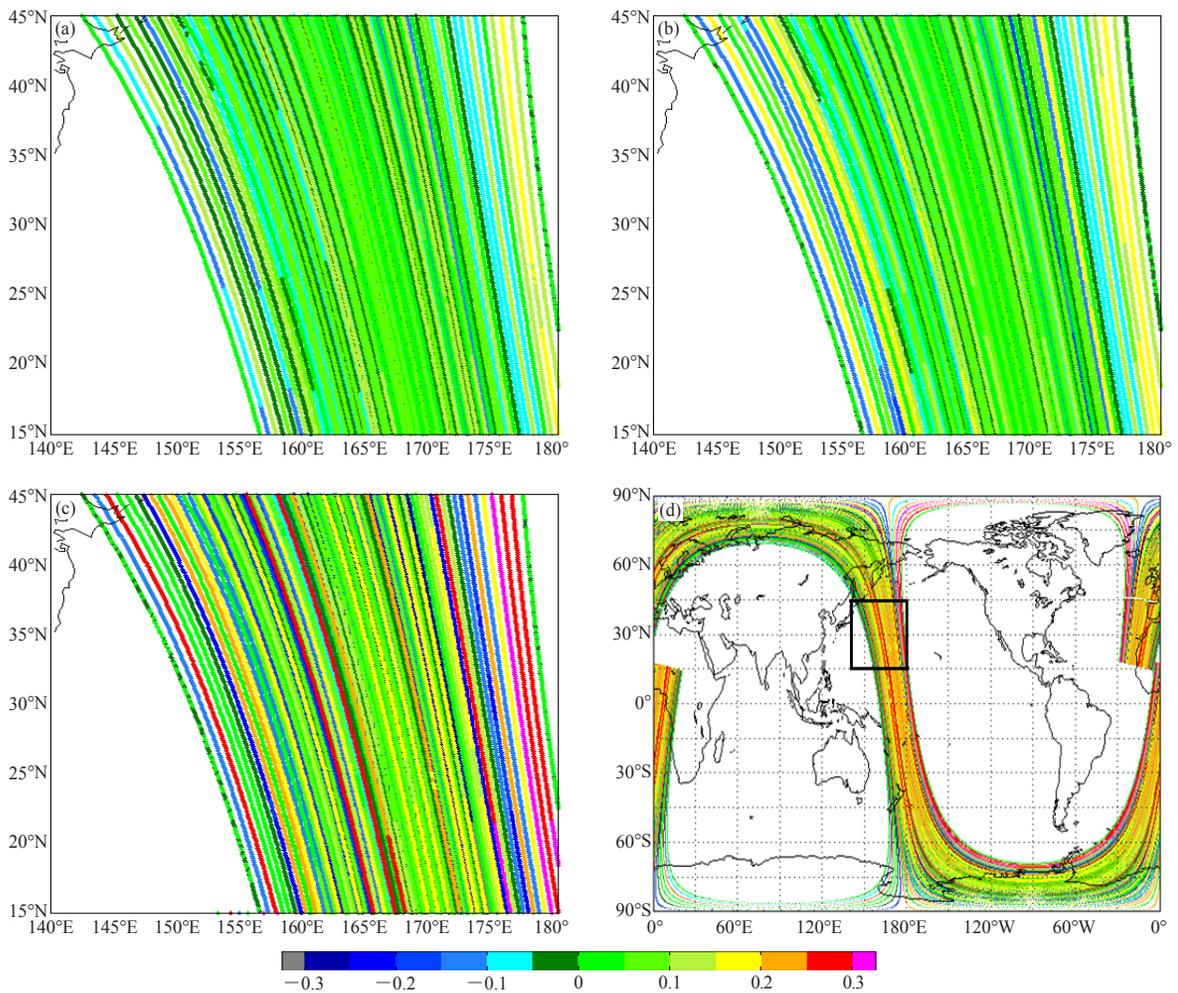


图8 2011年4月2日01:14—02:55 (世界时) 通道3 (a), 4 (b), 5 (c) 观测场与重构场之间的差值; (d) 与 (c) 相同, 为整轨资料, 黑框为 (a) ~ (c) 中的区域

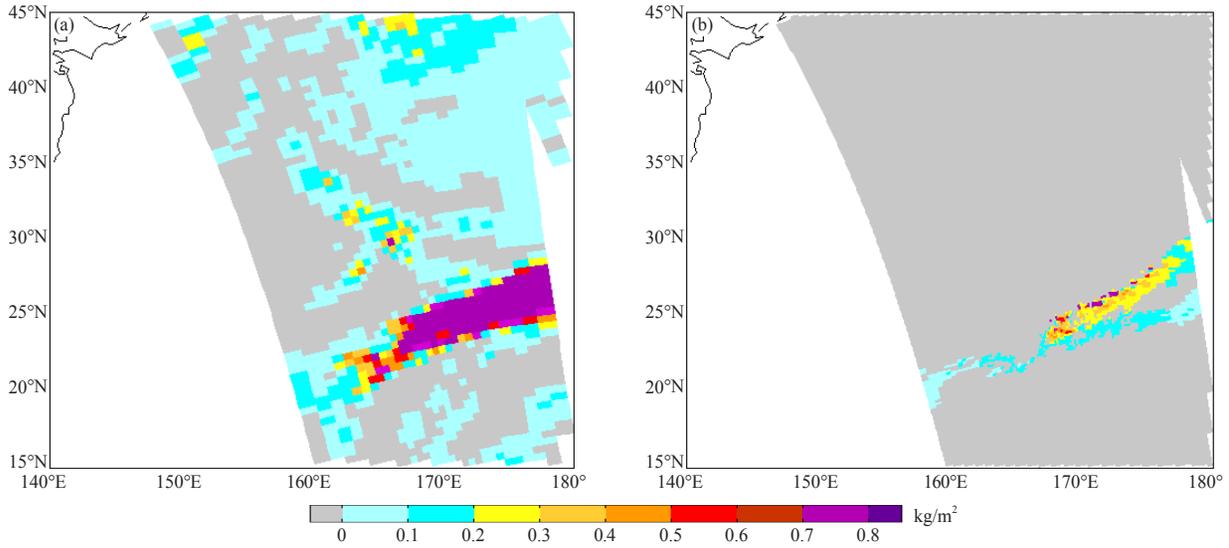


图9 2011年4月2日01:00—02:49 (世界时) 图8 (a) ~ (c) 区域中用NOAA-18 AMSU-A和MHS地表通道观测反演的云水路径 (a) 和冰水路径 (b)

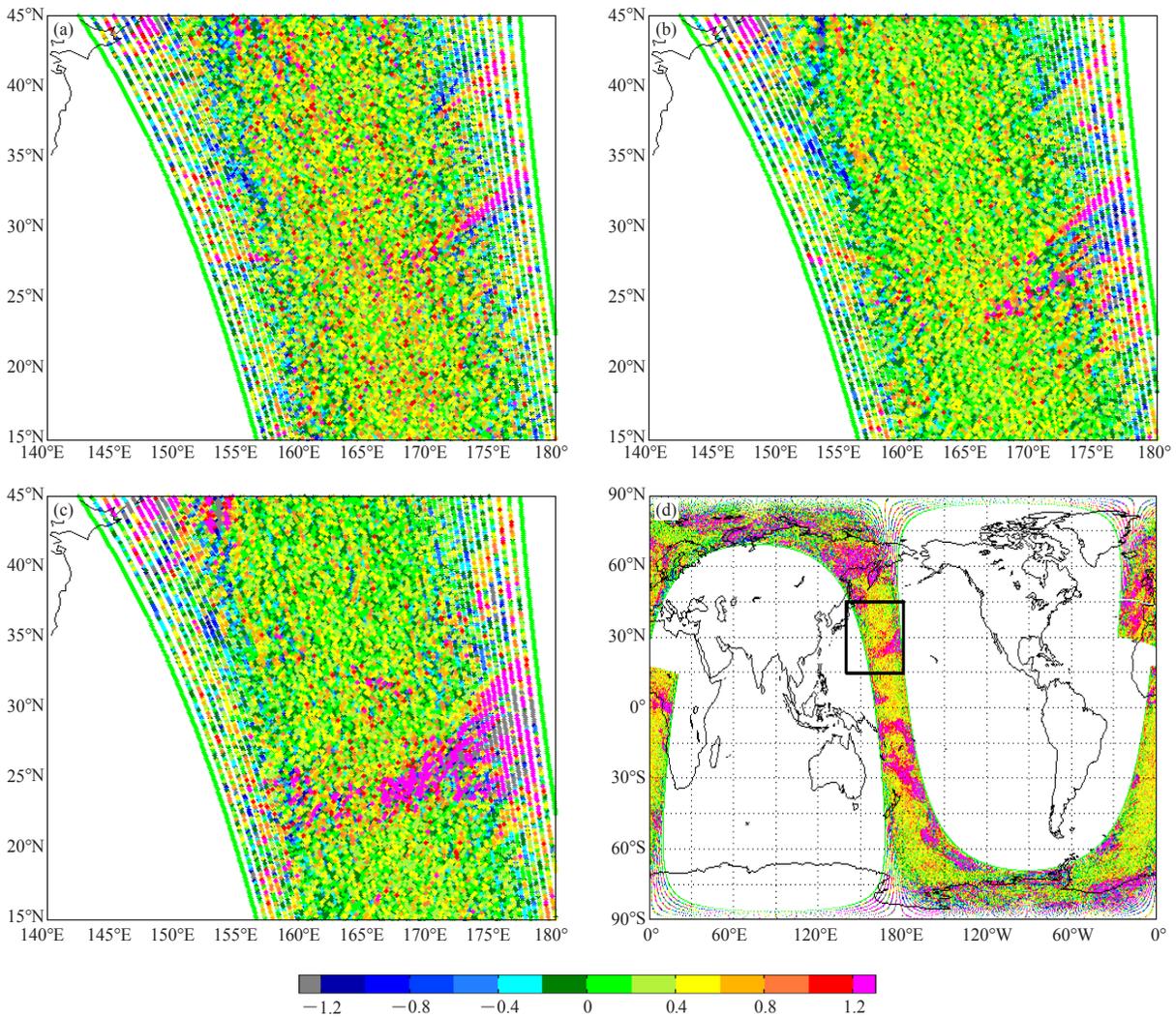


图10 2011年4月2日01:14—02:55 (世界时) 通道3 (a), 4 (b), 5 (c) 观测与5点平滑的亮温场之间的差值; (d) 为整轨资料, 黑框为 (a) ~ (c) 中的区域

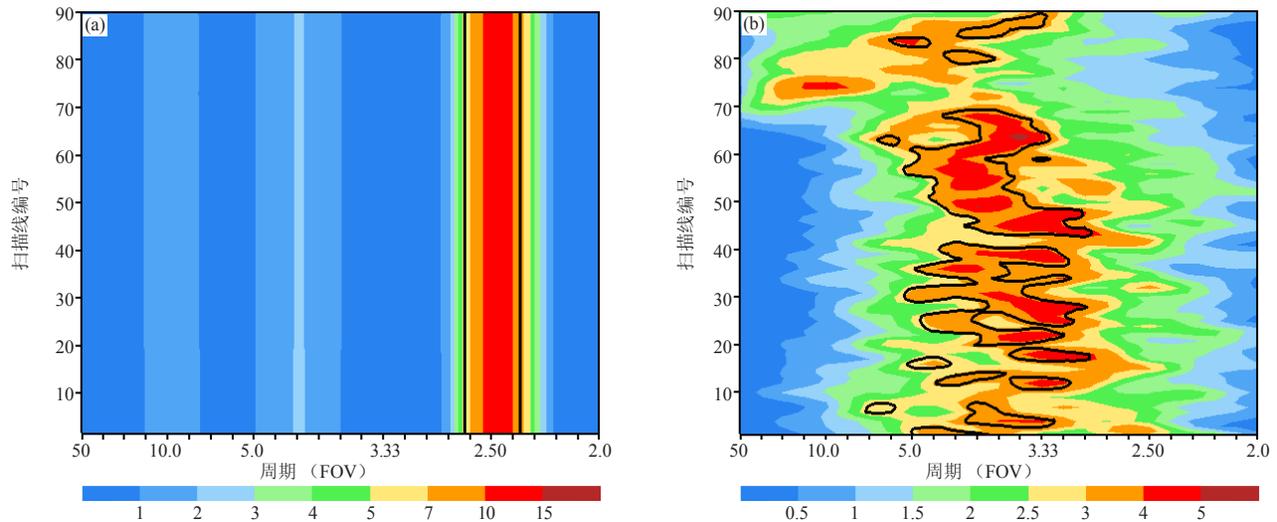


图11 图8c (a) 和图10c (b) 中所有完整扫描线上数据的功率谱密度 (等值线为95%置信度)

于PCA对原观测数据的重构提供了一个有效的数据滤波器。这种方法不仅准确、稳定,使用起来也很灵活方便。该方法可以对每轨资料使用,也可以对一小段资料单独使用。噪音产生的原因目前还不明确,有必要在以后的工作中进行更深入的探究。

参考文献

- [1] Dong C, Yang J, Zhang W, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: 1531-1544.
- [2] Zhang P, Yang J, Dong C, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3: 367-373.
- [3] Mo T, Jarva K. Microwave humidity sounder calibration algorithm. NOAA Tech Report, NESDIS 116, 2004.
- [4] Weng F, Ferraro R R, Grody N C. Effects of AMSU-A cross track asymmetry of brightness temperatures on retrieval of atmospheric and surface parameters// in *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere*, edited by Pampaloni P and Paloscia S, VSP Intl Sci Publ, 1999.
- [5] Weng F, Zhao L, Ferraro R, et al. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms. *Radio Sci*, 2003, 38: 33-1-33-13.
- [6] Buehler S A, Kuvatov M, John V O. Scan asymmetries in AMSU-B data. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L24810.
- [7] Antonelli P, Revercomb H E, Sromovsky L A, et al. A principal component noise filter for high spectral resolution infrared measurements. *J Geophys Res*, 2004, 109, D23102.
- [8] Tobin D C, Antonelli P, Revercomb H E, et al. Hyperspectral data noise characterization using principal component analysis: application to the atmospheric infrared sounder. *J Appl Remote Sensing*, 2007, 1, 013515.
- [9] Tobin D C, Revercomb H E, Antonelli P. Principal component analysis of IASI spectra with a focus on non-uniform scene effects on the ILS. *AIP Conference Proceedings*, 1100, 16, 2009.
- [10] Boukabara S A, Garrett K, Chen W. Global Coverage of total precipitable water using a microwave variational algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48: 3608-3621.
- [11] Andersson E, Bauer P, Beljaars A, et al. Assimilation and modeling of the atmospheric hydrological cycle in the ECMWF Forecasting System. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86: 387-402.
- [12] Weng F. Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 3799-3807.
- [13] Han Y, Weng F, Liu Q, et al. A fast radiative transfer model for SSMIS upper atmosphere sounding channel. *J Geophys Res*, 2007, 112, D11121.